

Institut für Reaktorentwicklung
KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH
des Landes Nordrhein-Westfalen

SPANNBETON-
REAKTORDRUCKBEHÄLTER

von

Dipl.-Ing. Th. Jaeger

Jül - 82 - RG

Dezember 1962

Sonderdruck

aus „Der Bauingenieur“, 37. Jahrg. (1962), Heft 9, S. 357-361
Springer-Verlag, Berlin · Göttingen · Heidelberg

Berichte der Kernforschungsanlage Jülich – Nr. 82

Institut für Reaktorentwicklung Jül – 82 – RG

Dok.: PRESTRESSED-CONCRETE REACTOR PRESSURE VESSELS

DK: 521.039.584 · 624.953.012.46 (047.6)

Zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich,
Jülich, Bundesrepublik Deutschland

DK 621.039.584 : 624.953.012.46 (047.6)

Spannbeton-Reaktordruckbehälter

Bei Leistungsreaktoren, die als Wärmeträger ein komprimiertes Gas verwenden, ist bei gegebener höchstzulässiger Temperatur der Spaltstoffelemente die Steigerung der Nettoleistung des Reaktorsystems proportional der Vergrößerung des Durchmessers des Reaktorkernes und der Erhöhung des Gasdruckes. Somit wird die Bemessung des Druckbehälters zum Kardinalpunkt der Bemessung der ganzen Kernkraftanlage.

Neuere britische Studien über kerntechnische Variationen des mit natürlichem Uran arbeitenden, gasgekühlten, graphitmoderierten Leistungsreakortyps haben Schwierigkeiten in der Realisierung des vollen theoretischen Potentials ergeben oder nicht

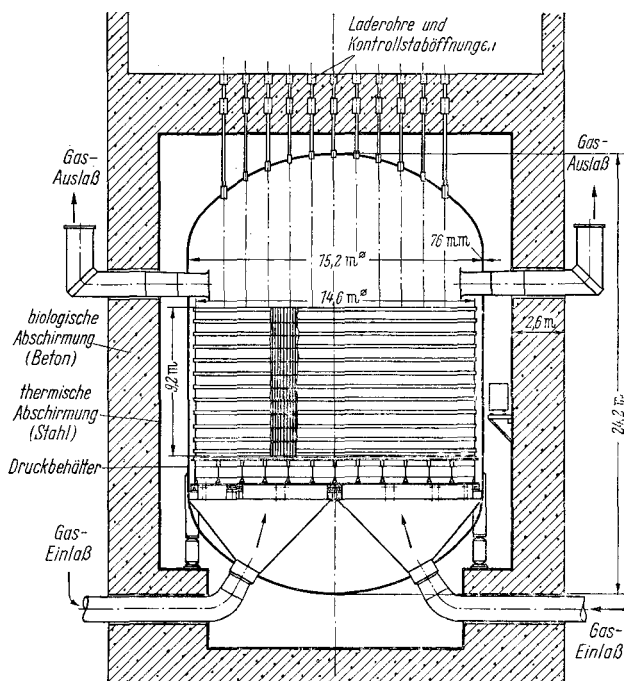


Abb. 1. Vertikalschnitt durch Druckbehälter und primäre Strahlenabschirmung eines Berkeley-Reaktors [1].

zu wesentlichen wirtschaftlichen Vorteilen geführt. Ein bedeutender Schritt vorwärts sowohl in bezug auf die Wirtschaftlichkeit als auch auf die Sicherheit dieses Leistungsreakortyps kann jedoch durch eine neuartige bautechnische Konzeption erzielt werden: durch den Ersatz des herkömmlichen stählernen Reaktordruckbehälters durch eine Spannbetonkonstruktion [22, 23].

1. Reaktordruckbehälter aus Stahl

Die drei Erfordernisse: 1. Druckhaltevermögen, 2. Gasdichtigkeit und 3. Strahlenabschirmung werden üblicherweise durch Verwendung eines stählernen Druckbehälters mit umgebender Strahlenabschirmung aus Beton erfüllt. Der Bau sehr großer Druckbehälter aus Stahl gibt schwierige schweißtechnische Probleme auf, die den Reaktorabmessungen zusammen mit dem verwendeten Innendruck eine definitive Grenze setzen. Typische Konstruktionen zeigen die Abb. 1 und 2.

Der stählerne Reaktor-Druckbehälter der mit natürlichem Uran arbeitenden, graphitmoderierten Reaktoren (Wärmeträger Kohlendioxidgas bei einem Betriebsdruck von $8,8 \text{ kg/cm}^2$ verwenden, ist ein vertikaler Zylinder mit $15,2 \text{ m}$ ϕ Leistung 560 MW) des britischen Berkeley-Kernkraftwerkes, die und $24,2 \text{ m}$ Höhe mit ellipsoidförmigen Enddomen (Abb. 1). Der Angelpunkt des Entwurfes des Kernkraftsystems war die maximale Dicke der Stahlbleche (76 mm), die unter Baustellenbedingungen den strengen Erfordernissen der Anlage gemäß geschweißt werden konnten. Der Prüfdruck betrug $14,8 \text{ kg/cm}^2$. Die den Reaktor umgebende biologische Abschirmung aus normalem Kiesbeton hat eine Dicke von $2,6 \text{ m}$. — Abb. 2 zeigt einen sphärischen Reaktor-Druckbehälter ($20,4 \text{ m}$ ϕ) des Kernkraftwerkes Hinkley Point, dessen Reaktoren vom gleichen Typ sind mit einer Wärmeleistung von 960 MW und einem CO_2 -Betriebsdruck von 13 kg/cm^2 (Prüfdruck $21,8 \text{ kg/cm}^2$). Die biologische Beton-Abschirmungskonstruktion hat eine Dicke von $3,0 \text{ m}$.

2. Allgemeine Konstruktionsprinzipien für Spannbeton-Reaktordruckbehälter

Bei der Errichtung der mit natürlichem Uran arbeitenden, graphitmoderierten, CO_2 -gekühlten G2- und G3-Reaktoren (Wärmeleistung 200 MW) in Marcoule ist erstmalig eine alternative Lösung für die Konstruktion des Druckbehälters zur Anwendung gekommen: Ein Reaktor-Druckbehälter aus Spannbeton kombiniert Druckhaltevermögen und Strahlenabschirmung, die Gasdichtigkeit wird durch eine innere Stahlblechhauskleidung erzielt ([2] bis [12]). Die Entscheidung, die Druckbehälter für die G2- und G3-Reaktoren aus Spannbeton herzustellen, wurde im Sommer 1955 gefällt. Damals bestanden gewisse Bedenken gegen diese Entwurfskonzeption, die aber durch die hervorragende Betriebsbewährung der Konstruktion (Inbetriebnahme 1959) klar widerlegt worden sind. Für den derzeit bei Chinon im Frankreich im Bau befindlichen größten gasgekühlten Leistungsreaktor der Welt (elektrische Nutzleistung 375 bis 400 MW)¹ wird ein vertikaler zylindrischer Spannbeton-Reaktor-Druckbehälter mit $18,4 \text{ m}$ Innendurchmesser und 21 m lichter Höhe verwendet (das Betongewicht wird mit $60\,000 \text{ t}$ angegeben).

Der Erfolg der französischen Pioniertat hat in anderen Ländern, die an der Weiterentwicklung des gasgekühlten Reaktortyps arbeiten, insbesondere in der Tschechoslowakei und in

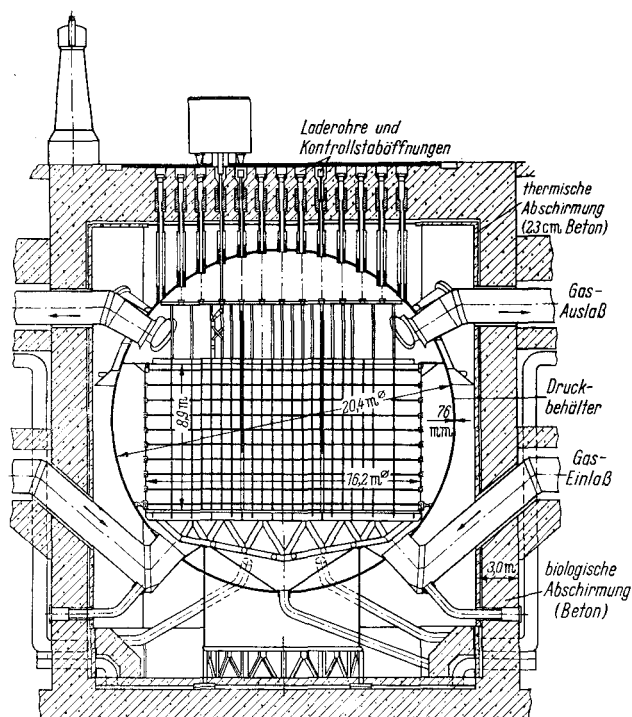


Abb. 2. Vertikalschnitt durch Druckbehälter und primäre Strahlenabschirmung eines Hinkley Point-Reaktors [1].

Großbritannien, theoretische und experimentelle Untersuchungen und Entwurfsstudien über die Probleme der Verwendung von Spannbeton für den Bau großer Reaktordruckbehälter angeregt ([13] bis [23]). Man gelangte übereinstimmend zu der Überzeugung, daß Spannbeton ein Maximum an technischen Möglichkeiten für den Bau sehr großer Druckbehälter bietet: 1. Große Formgebungsfreiheit, 2. die Ermöglichung von Behälterabmessungen und Drücken, wie sie sich bei der Verwendung von Stahl nicht erzielen lassen, und 3. hohe Sicherheit im Vergleich mit stählernen Druckbehältern.

Als Konstruktionsform kommt ein dickwandiger Betonzylinder, der durch sekantenförmig oder ringförmig angeordnete Spannglieder vorgespannt ist, in Frage. Die Lage des Zylinders kann vertikal oder horizontal sein; die Entscheidung darüber obliegt den Reaktor-Konstrukteuren. Der innere Durchmesser ist die wichtigste Abmessung des Behälters, wogegen die Zylinderlänge vom konstruktiven Standpunkt unwichtig ist. Die Dicke der Behälterwand ergibt sich in erster Linie aus den Erfordernissen der Abschirmung der Reaktorstrahlung. Vom statischen Gesichtspunkt kann eine geringere Dicke im Hinblick auf die Wärmespannungen und den Bedarf an Spannstahl vorteilhafter sein. Aus diesem Grunde ist es in Betracht zu ziehen, nur einen getrennt wirkenden Teil der gesamten Wanddicke vorzuspannen. Für die Vorspannung des zylindrischen Behälterteils

¹ Wärmeleistung vermutlich bis 1250 MW .

kommen drei Vorspann-Arten in Betracht: Die Sekanten-Vorspannung, die Ringvorspannung mit einzelnen Spanngliedern und die Vorspannung nach dem Wickelverfahren. Bei der Sekanten-Vorspannung (Abb. 3) werden in dem Hohlzylinder gerade Kabelbahnen ausgespart, die in einzelnen Schichten gleichschenklige Dreiecke, Quadrate oder regelmäßige Vielecke bilden [16, 17]. Die Scheitelpunkte dieser geometrischen Formen

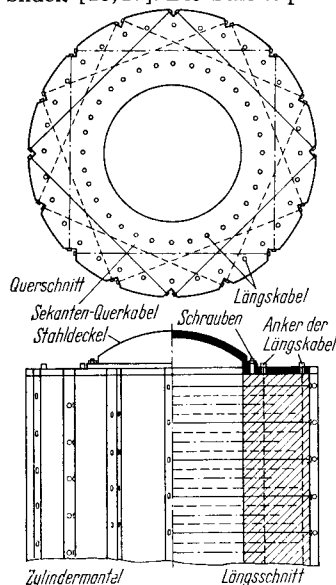


Abb. 3. Schematische Darstellung des Sekanten-Vorspannverfahrens von Spannbeton-Druckbehältern.

Verwendung von Gleitplatten bewirkt werden. Beim Wickelverfahren ist eine Umwicklung des Zylinders mit vorgespanntem Draht entweder nur entlang der Außenfläche oder auch in einigen Schichten mit dazwischenliegenden Betonschichten möglich. Letzteres Verfahren hat den Nachteil, daß eine Kontrolle des Stahles in den inneren Schichten nicht möglich ist. Wenn kein kontinuierlicher Verbund vorgesehen wird, ist es zweckmäßig, die Wicklung in nicht zu großen Abschnitten zu verankern.

Während die Konstruktion des zylindrischen Behälterteils eine verhältnismäßig einfache Aufgabe darstellt, ist die Ausbildung des Abschlusses des Behälters ein schwieriges Konstruktionsproblem. Aus Gründen der Strahlenabschirmung ist die Verwendung von stählernen Deckeln (s. Abb. 3) nicht zweckmäßig, da diese eine zusätzliche Betonabschirmung erfordern. Vorteilhaft ist jedoch die Abnehmbarkeit stählerner Endverschlüsse. Beton-Abschlüsse können in Form von Platten ausgebildet werden, deren große Dicke wahrscheinlich eine konstruktiv genügende Anordnung von Vorspannkabeln in zwei oder drei Richtungen ermöglicht; die Endplatten müssen durch Längs-Vorspannkabel parallel der Zylinderachse gehalten werden. Eine alternative und konstruktiv bessere Lösung ist die Ausbildung von kuppelförmig nach innen gewölbten Endteilen, die sich unter der Wirkung des inneren Gasdruckes unter Druckbeanspruchung befinden. Die radialen Kräfte des sphärischen Gewölbes in den Auflagern können durch eine Ringvorspannung aufgefangen werden. Für eine sichere Übertragung dieser Ringvorspannkräfte im unbelasteten Zustand des Behälters muß durch Füllbeton-Einlagen gesorgt werden. Die theoretische Erfassung des diskontinuierlichen Spannungszustandes im Endabschnitt ist schwierig.

Bei einem heterogenen Reaktor üblicher Bauart muß eine der Endkuppeln einen dichten Rost von Hülsenrohren für die Durchführung der Spaltstoffbeschickung und -entladung des Reaktorkerns enthalten. Für die Durchführung der großen Kühlgas-Einlaß- und -Auslaßrohre bestehen zwei Möglichkeiten: Durchführung durch die Endkuppeln des Behälters oder Durchführung durch die zylindrische Behälterwand in einer Zone zwischen dem Ende des Zylinders und der Kuppel, wo nur eine schwächere Ringbewehrung erforderlich ist. — Für die Konstruktion eines Druckbehälters für einen Kugelhaufenreaktor ergeben sich etwas unterschiedliche Anforderungen.

Als Werkstoff für die gasdichte innere Membrane ist Baustahl gut geeignet, da dieses Material nahezu den gleichen linearen Wärmedehnungskoeffizienten wie Beton hat und daher mit der inneren Betonwandung verbunden werden kann, wenn Membrane und Betonwand etwa auf gleicher Temperatur gehalten werden. Baustahl verfügt über einen genügenden Korrosionswiderstand gegenüber dem Kühlgas auch bei hohen Temperaturen. Die Prüfung der Gasdichtigkeit der Membrane

kann entweder durch radiographische Untersuchung sämtlicher Schweißnähte oder durch pneumatische Dichtigkeitsprüfung nach beendeter Herstellung erfolgen. Im letzteren Falle ist eine Behälterform mit nach außen konvexen Endkuppeln erforderlich. — Beim Betonieren dient die gasdichte Membrane als Innenschalung, sie ist für den Lastfall des Betoniervorganges zu bemessen. Im Betriebszustand wird die Auskleidungs-membrane direkt vom umgebenden Beton gestützt. Die Arbeiten an der Konstruktion des Reaktorkerns im Innenraum des Behälters können gleichzeitig mit den Betonierarbeiten begonnen werden.

Modellversuche haben [22] zufolge gezeigt, daß eine gasdichte Auskleidung aus Baustahlblech unter weit über den Bemessungsdruck hinausgehenden Innendrüken fließt und simultan mit der Bildung von durch die ganze Betonwand laufenden Rissen örtlich aufreißt. Durch den damit ermöglichten Gasaustritt wird der Innendruck reduziert. Wenn die Bemessung so vorgenommen wird, daß dieser Vorgang unterhalb der Grenzbelastung der Vorspannkabel eintritt, schließen sich nach dem Druckablaß die Betonrisse unter dem Einfluß der Vorspannkabel wieder. Trotz erheblicher Beschädigung kann somit — im Gegensatz zu dem Fall des Zerreißens eines stählernen Reaktordruckbehälters — die Freisetzung großer Mengen radioaktiver Substanzen verhütet werden.

Thermische Aspekte spielen bei der Verwendung von Spannbeton-Reaktordruckbehältern eine bedeutende Rolle. Die ungleichförmige Erwärmung der dicken Behälterwand kann sich auf den Spannungszustand ungünstiger auswirken als der innere Überdruck. Die Betonkonstruktion ist zwei Wärmequellen ausgesetzt: 1. der Wärme des strömenden Gases und 2. der durch die Abschwächung der Neutronen- und Gammastrahlung bewirkten inneren Wärmezeugung. Der Einfluß dieser Wärmequellen kann durch ein adäquates Kühlsystem und durch Anordnung einer thermischen Abschirmung gering gehalten werden. Für die Kühlung des Behälters kommen zwei Möglichkeiten in Betracht: Gaskühlung der inneren Seite der Stahlblechauskleidung oder Wasserkühlung der an die Auskleidung angrenzenden inneren Betonschicht.

Der Bau von großen dickwandigen Behältern aus Spannbeton stellt ein völlig neues Gebiet dar und erfordert grundsätzliche theoretische, konstruktive und technologische Untersuchungen. Einige Betrachtungen und theoretische Studien über das Problem der Wärmespannungen in Beton-Reaktorabschirmungen infolge der nichtlinear verteilten Wärmezeugung liegen vor [24 bis 29]. Spannungsgleichungen für den dickwandigen sekantenförmig vorgespannten Betonzylinder, mit denen das Spannungsfeld sowohl in verschiedenen Bauphasen als auch im Betriebszustand ermittelt werden kann, sind von R. Servit [14] [15] abgeleitet worden. Die Ermittlung des Temperaturspannungsfeldes infolge der strahlungsinduzierten ungleichförmigen Erwärmung der Spannbeton-Behälterwandung sowie die Erfassung der Störungen des Spannungsfeldes an der Verbindungsstelle von Endkuppeln und Hohlzylinder und in der Umgebung großer Öffnungen bereitet besondere theoretische Schwierigkeiten.

Die konstruktiven Fragen sind vielfältig und betreffen in erster Linie die Anordnung der hohen Anzahl großer Vorspannglieder und die Entwicklung eines konstruktiv und wirtschaftlich befriedigenden Vorspannsystems. Ein anderes konstruktives Problem hängt mit der Aufgliederung der inneren Schichten zur Reduzierung der Wärmespannungen zusammen. — Ein besonderes technologisches Problem besteht in dem auf dem Dehydrationsprozeß beruhenden schädigenden Einfluß hoher Temperaturen auf die mechanischen und Neutronenabschirmungseigenschaften von Beton. Eine auf ihre Brauchbarkeit zu untersuchende mögliche Lösung ist die Verwendung von Serpentin-Zuschlägen [30].

Abb. 4 zeigt den Entwurf eines Spannbeton-Reaktordruckbehälters für einen gasgekühlten Leistungsreaktor von fortgeschrittenem Typ, bei dem die Ringvorspannung durch einzelne Kabel eingetragen wird [19]. Der Behälter besteht aus einem vertikalen Hohlzylinder mit einem Innendurchmesser von 12,8 m, einer lichten Höhe von 13,7 m und einer Wanddicke von 2,4 m und zwei kuppelförmig nach innen gewölbten Endteilen. Die Kühlgasleitungen werden durch die zylindrische Behälterwand geführt. Der Behälter ist für einen Betriebsdruck von 22 kg/cm² und für einen Prüfdruck von 35 kg/cm² bemessen. Sämtliche Vorspannkabel bestehen aus fünfzig 8-mm-Drähten. Die gesamte Vorspannkraft beträgt je 250 t; die Reibungsverluste in den über einen Halbkreisbogen von zwei Seiten vorgespannten Ringkabeln betragen 20 %, alle übrigen Vorspannverluste 23 %. Die Ring-Vorspannkabel sind in vier Schichten in Abständen von 25 cm angeordnet. Die Endkuppeln werden durch 163 Vertikalkabel gehalten. Die Gesamtzahl der Verankerungen

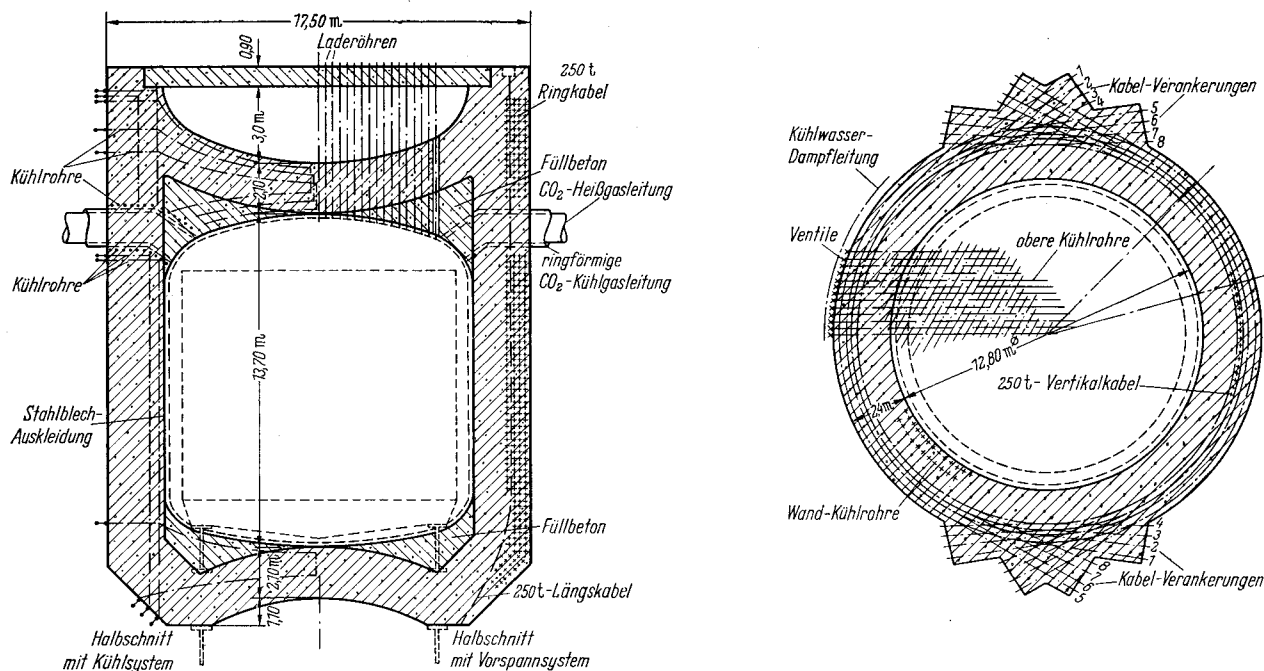


Abb. 4. Vertikal- und Horizontalschnitt durch die Konstruktion eines Spannbeton-Reaktordruckbehälters [19].

beträgt 1434. — Der Spannbetonbehälter ist mit 25 mm dickem Baustahlblech gasdicht ausgekleidet.

Ein ähnlicher Entwurf für einen Spannbeton-Reaktordruckbehälter mit Wickelvorspannung wird in [20] beschrieben. Dieser Behälter ist für einen Betriebsdruck von $41,8 \text{ kg/cm}^2$ (der einen Sicherheitszuschlag für Kriechen, thermische Zyklen usw. enthält) und einen Prüfdruck von $56,9 \text{ kg/cm}^2$ bemessen. Er besteht aus einem vertikalen Hohlzylinder mit einem Innendurchmesser von 11,0 m, einer lichten Höhe von 13,7 m und einer Wanddicke von 3,05 m und zwei kuppelförmig nach innen gewölbten Endteilen von 12,2 m Krümmungsradius und 175 cm Dicke, die für die volle Strahlenabschirmung durch Stahlbeton-Diaphragmaplatten von 215 cm Dicke ergänzt werden. Die Kühlgasleitungen werden durch die untere Kuppel geführt. Die Kuppeln werden durch 60 parallel zur Zylinderachse verlaufende Vorspannkabel gehalten, die aus je 715 Drähten von 5 mm ϕ bestehen. Die Ringvorspannung des zylindrischen Behälterteils erfolgt nach dem Wickel-Vorspannverfahren mit Draht von 5 mm ϕ und einer Windung je cm in 21 Schichten. (Die Baumassen bzw. -gewichte sind: 4600 m³ Beton, 150 t Längsvorspannkabel, 260 t Wickeldraht, 150 t normaler Bewehrungsstahl.)

3. Ausgeführter Spannbeton-Reaktordruckbehälter

Abb. 5 zeigt die Konstruktion des Spannbeton-Druckbehälters des G2-Reaktors in Längs- und Querschnitt. Der Behälter besteht aus einem horizontalen Hohlzylinder mit einem Innendurchmesser von 14,0 m, einer Länge von 18,0 m und einer Wanddicke von 3,0 m und zwei kuppelförmig nach innen gewölbten Endteilen, die durch 46 Spannkabel ohne Verbund parallel zur Zylinderachse gehalten werden. Die 57 Ringvorspannkabel umschließen den Zylinder über einen Zentralkabel von 250 t und werden tangential zu der unter dem Behälter verlaufenden Verankerungsgalerie geführt. 58 Quervorspannkabel vervollständigen die Wirkung der Ringvorspannkabel.

Der Behälter ist für einen Betriebsdruck von 15 kg/cm^2 und eine Druckprobe von etwa 30 kg/cm^2 bemessen. Gasdruck und Reaktorleistung sind so gewählt, daß die statisch erforderliche Dicke der Behälterwandung geringer als die für die biologische Strahlenabschirmung erforderliche Dicke ist. Zur Herabsetzung der Wärmespannungen und zur Vermeidung einer Temperaturschädigung des Betons ist neben dem CO₂-Hauptkreislauf mit einer maximalen Gastemperatur von 350° C ein sekundäres Kreislaufsystem installiert, das die den Reaktorkern umgebende

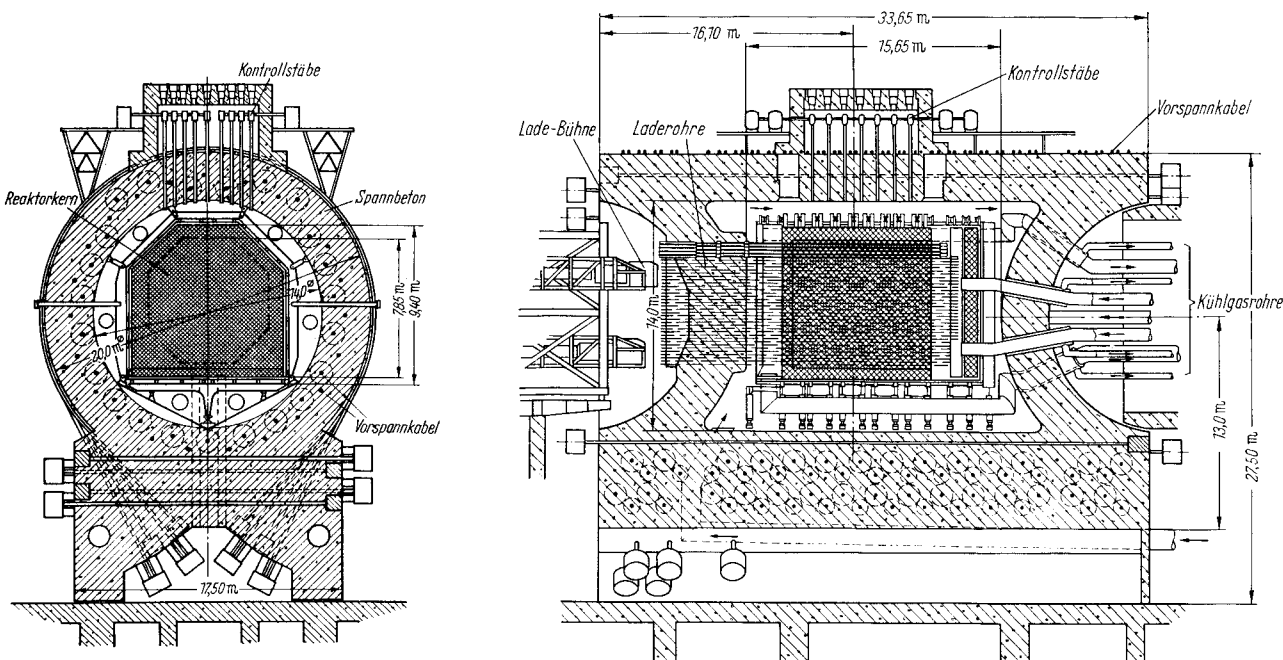


Abb. 5. Schnitte durch den Spannbeton-Reaktordruckbehälter des französischen G2-Reaktors [1].

gußeiserne thermische Abschirmung kühlt und so bemessen ist, daß die Betontemperatur überall unterhalb 100° C bleibt.

Die Sicherheit des Druckbehälters läßt sich durch die Höhe der eingetragenen Vorspannung beeinflussen. Um die Möglichkeit eines plötzlichen Bruches auszuschließen, wurde eine mäßige Vorspannung gewählt, so daß einerseits eine genügende Vorwarnung des Bruches durch stärkere Ribbildung gegeben ist, und andererseits eben durch die sich im Katastrophenfall in genügender Anzahl und Weite vor dem Bruch bildenden Risse eine Reduktion des Innendruckes erreicht wird. Die Spannkabel, die aus Bündeln von 700 Drähten von 5 mm ϕ bestehen, wurden sämtlich mit 1200 t vorgespannt. Ein Zugversuch ergab eine Bruchlast von über 2200 t bei 2 % Verlängerung und zeigte, daß die Grenztragfähigkeit des Kabels in den Spanndrahtseilen selbst und nicht in der Verankerung liegt.

Die hauptsächlich konstruktive Schwierigkeit beim Entwurf der Spannbeton-Reaktordruckbehälter bestand in der Auslegung der ringförmigen Kabel und in der Herabsetzung ihrer Reibung auf dem Beton. Mit einem Reibungskoeffizienten von 0,20 verlor man z. B. 60 % der Kabelspannung. Um den Reibungskoeffizienten stark zu verringern, wurden an den Kabeln stählerne Gleitschuhe befestigt, die auf in den Beton eingelassenen Stahlscheiben gleiten können. Bei Verwendung von Molybdändisulfat-Fett als Gleitmittel ergaben Versuchs-Meßergebnisse Reibungskoeffizienten zwischen 0,02 und 0,025.

Da bei Beton keine Gasdichtigkeit erwartet werden kann, wurde die gesamte innere Behälterfläche mit einem Dichtungsblech aus gewöhnlichem Baustahl mit einer Dicke von 30 mm ausgekleidet. Die Befestigung dieses Bleches auf dem Beton geschieht mittels 14 000 angeschweißten Ankern. Das Dichtungsblech diente gleichzeitig beim Bau als Innenschalung für die Betonierung.

Zur Erprobung des statischen Verhaltens der zur Ausführung vorgesehenen Konstruktion wurden drei Modelle im Maßstab 1:10 gebaut, die für die vollständige Zerstörung durch pneumatische Druckproben in einem unterirdischen Stollen vorgesehen wurden [12]. Dabei wurden die Modellbehälter zur Herabsetzung der potentiellen Zerstörungsenergie bis auf ein kleines Restvolumen mit Wasser gefüllt und mit einer Quelle komprimierten Gases verbunden. Die Modelluntersuchungen wurden ohne Berücksichtigung des Temperatureinflusses durchgeführt. Die bei den Versuchen beobachtete Verhaltensweise lag bis zu ca. 30 kg/cm² im betriebssicheren Bereich. Oberhalb dieser Grenze begannen sich die Böden zu öffnen. Die Zerstörungsdrücke durch Wegschleudern der Böden betrugen 65 bis 70 kg/cm². Die günstigen Versuchsergebnisse, deren Ergebnisse den Vorausberechnungen entsprechen, gaben den Ausschlag für die Bauteilscheidung. Nach Fertigstellung der Reaktordruckbehälter wurde der Behälter für G2 ohne vorherige Prüfung mit seiner baulichen Innenausrüstung versehen: Träger, Wärmeschutz, Graphit. Gleichzeitig wurde der G3-Druckbehälter, der zu dieser Zeit nur ein Druckmantel ohne Innenausrüstung war, hydraulisch geprüft. Nach Reparatur einiger Leckstellen wurde der Versuch bis zu einem Innendruck von 31,2 kg/cm² durchgeführt. Der G2-Behälter wurde auf der Grundlage der bereits erworbenen Erfahrungen einer pneumatischen Druckprobe bis 24 kg/cm² unterworfen.

4. Revolutionäre Entwurfskonzeption britischer Firmen

Britische Firmengruppen haben in Ausschöpfung der großen konstruktiven Möglichkeiten von Spannbeton-Reaktordruckbehältern eine radikal neue Konzeption für die Anordnung des primären Reaktorsystems entwickelt: Der gesamte primäre Kühlkreislauf wird zusammen mit dem Reaktorkern von einem einzigen großen zylindrischen Spannbetonbehälter umschlossen [22, 23]. (Nähere technische Einzelheiten sind bisher noch nicht veröffentlicht worden.)

Eine solche Anordnung verbessert unter anderem auch die Sicherheitsaspekte großer gasgekühlter Leistungsreaktoranlagen, die normalerweise keinen Sicherheitseinschluß durch eine separate gasdichte und druckfeste Containerschale erhalten (s. [32]). Bei gasgekühlten Reaktorsystemen mit hohem Aktivitätsniveau im Kühlgas, wie im Falle des Kugelhaufenreaktors, ergibt diese neue Entwurfskonzeption eine Alternative für die in diesem Falle bestehende Notwendigkeit für einen besonderen Sicherheitseinschluß.

Literatur

1. Directory of Nuclear Reactors. Vol. I. Power Reactors. International Atomic Energy Agency, Wien 1959.
2. A New Shield for Pressurized Atomic Reactors. (Translated from French Patent No. 752, 436), AEC-tr-4882, 26. November 1957.
3. A. Ertraud: The French Approach to Power Reactors. The G2 and G3 Double Purpose Reactors. *Atomics & Nuclear Energy* 8 (1957), No. 2, S. 52—59.

4. Bulletin d'Informations Scientifiques et Techniques. Centre d'Etudes Nucleaires de Saclay, August 1958.
5. Pascal, Horowitz, Bussac, Joatton, de Lagge de Meux, Martin: General Specifications and Original Aspects of Reactors G2 and G3. Second United Nations International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, Genf, 1.—13. September 1958, Paper No. A/CONF. 15/P/1133.
6. Description des Reacteurs G2—G3. Ibid., Paper No. A/CONF. 15/P/1134.
7. G. Deleuze u. M. Tourasse, Marcoules's Reactors G2 and G3. Part A, Active Core and Vessel. Nuclear Engineering & Science Conference, Cleveland, Ohio, 6.—9. April 1959, Preprint V-140.
8. J. Bellier u. M. Tourasse: Centre Nucléaire de Marcoule, France, caissons en béton précontraint des reacteurs G2 et G3. *Annales, Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics*, No. 139—140, Juli-August 1959 S. 705—736.
- 8a. J. Bellier: Prestressed Concrete Pressure Vessels at Marcoule Nuclear Center. The Design of the Pressure Vessels. — M. Tourasse: The Construction of the Pressure Vessels. Cement and Concrete Association, London 1960.
9. J. Bellier u. M. Tourasse: Concrete Pressure Vessels. Novel Design and Construction in French Reactors G2 and G3. *The Civ. Engineer*, 13 (1959), No. 2, S. 71—75.
10. L. Maillard: Der Spannbeton-Druckbehälter des Reaktors G2. *Die Atomwirtschaft*, 6 (1961), No. 4, S. 233—238.
11. A. N. Komarowski: Stroitelstwo Jadernich Ustanowok. Abschn. 9—6. Gosudarstvennoje Energetitscheskoje Izdatelstwo, Moskau/Leningrad 1961.
12. N. Beaujoint: Modèles réduits de résistance des caissons en béton précontraint des piles G2 et G3. Kolloquium-Vortrag, Colloque International sur Modèles Réduits des Structures. Madrid, Juni 1959.
13. A. L. L. Baker: The Possibilities of Using Prestressed Concrete for Nuclear Power Plants Construction. *The Indian Concrete Journal*, 32 (1958), No. 12.
14. R. Servit: Der Spannungszustand eines dickwandigen zylindrischen Druckbehälters aus Spannbeton (in Tschechisch). *Jaderná Energie*, 4 (1958), No. 1, S. 19—26.
15. R. Servit: Der Spannungszustand eines dickwandigen Betonbehälters beim allmählichen Vorspannen (in Tschechisch). *Sborník řaditv inž. stavitelství k sedmdesátinám akad. V. Daska. Praha* 1959.
16. A New Prestressed Concrete Shield for Pressurized Atomic Reactors. (Translated from French Patent No. 775, 380), AEC-tr-4881, 26. September 1958.
17. R. Servit: Reaktordruckbehälter aus vorgespanntem Beton (in Tschechisch). *Jaderná Energie*, 6 (1960), No. 2, S. 37—45.
18. R. Servit: Reactor Pressure Vessels of Prestressed Concrete. *Technical Digest*, Prag, 3 (1961), No. 4, S. 28—33.
19. I. Davidson: Some Contributions from Nuclear Power to Engineering Practice. *Proc. of the Instn. of Civ. Eng.* 17 (1960), S. 121—136.
20. R. E. Strickland and T. J. Fowler: HRP-A 60 MW Natural Uranium Nuclear Power Station. *The Journal of the British Nuclear Energy Conf.* 6 (1961), No. 2, S. 151—158.
21. A. L. L. Baker, M. L. A. Moncrieff, I. W. Hannah and S. Gill: The Design, Construction, and Testing of a Prestressed Concrete Reactor Pressure Vessels Model. *Proc. the Instn. of Civ. Eng.* 20 (1961), S. 555—586.
22. F. Gill and I. W. Hannah: Prestressed Concrete Pressure Vessels. *Nuclear Power*, Vol. 7, No. 71, März 1962, S. 48—50.
23. Important Advance in Gas-Cooled Reactor Design Reported in Britain. *Nucleonics Week*, Vol. 2, No. 16, 20. April 1961.
24. H. S. Davis: Thermal Considerations in the Design of Concrete Structures for Shielding Atomic Power Plants. *Nuclear Engineering & Science Conference*, Chicago, 17.—21. März 1958, Preprint No. 9; Thermal Considerations in the Design of Concrete Shields. *Proc. ASCE* 84 (1958), No. ST 5, Part 1, Paper No. 1755.
25. L. Baron and M. G. Salvadori: Stresses Due to Thermal Gradients in Reactor Shieldings. *Proceedings ASCE*, 86 (1960), *J. Engg. Mech. Div.*, No. EM 3, Paper 2516, S. 153—164.
26. W. Bonsall: Stresses in Reinforced Concrete Shields for Nuclear Reactors. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, Vol. 16 (1960), S. 259—270; *The J. of the British Nuclear Energy Conf.* 6 (1961), No. 2, S. 128—133.
27. I. W. Hannah: The Determination of Thermal Stresses in Concrete Shields. *G. E. C. Atomic Energy Review*, Vol. 1, No. 4, September 1958, S. 209—216.
28. I. W. Hannah: Thermal Stress in Concrete. *Nuclear Engineering*, Vol. 6, No. 57, Februar 1961, S. 69—74.
29. C. P. Thorne: Concrete Properties Relevant to Reactor Shield Behavior. *Journal of the American Concrete Institute*, Vol. 32, No. 11, Mai 1961, S. 1491—1508.
30. H. E. Hungerford, R. F. Mantey and L. P. Van Maele: New Shielding Materials for High-Temperature Application. *Nuclear Science and Engng.* 6 (1959), No. 5, S. 396—408.
31. EDF-3. The World's Largest Gas-Cooled Reactor. *Nuclear Power*, Vol. 7, No. 69, Januar 1962, S. 73.
32. Th. Jaeger: Grundzüge der Strahlenschutztechnik. Kap. 19. Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg 1960.

Dipl.-Ing. Th. Jaeger, Institut für Reaktorentwicklung, Kernforschungsanlage Jülich.